基于矩估计理论-偏序集的深井矿山岩体质量评价模型研究*

朱明[1],杨鹏[2],刘奇[3,4],王亚军[3,4],张海云[3,4]

(1.兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730099;
2.巴彦淖尔西部铜业有限公司, 内蒙古 巴彦淖尔市 015500;
3.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
4.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:为提高深井矿山岩体质量评价的可靠性,克服传统评价模型中指标权重赋值存在争议性的问题,选取了5个影响因素,借助矩估计理论,获取合理的指标权重降序序列,将偏序集引入岩体质量分级中,提出建立了基于矩估计理论-偏序集的地下矿山岩体质量综合评价模型。以12个典型岩样为样本数据进行模型检验,并与传统评估模型结果比较。结果表明,该模型评价结果与物元可拓模型、未确知测度理论的评价结果完全一致,与VIKOR模型的排序结果完全吻合,表明其能准确实现岩体质量分级,在复杂地质条件下的岩体质量评估中具有良好适用性。最后将该模型应用到安徽省某铜矿岩体质量评价中,确定该矿山大理岩属于Ⅱ类岩体、蛇纹岩与闪长玢岩属于Ⅲ类岩体、矽卡岩属于Ⅳ类岩体,与现场调查情况相符,基于岩体质量分级结果提出支护优化方案,优化后的支护方案能够有效控制巷道变形,确保巷道长期稳定。

关键词:深井矿山岩体;岩体质量评价;矩估计理论;偏序集;支护方案

中图分类号:TD313;TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0116-11

Research on Quality Evaluation Model of Deep Mine Rock Mass Based on Moment Estimation Theory-Partial Order Set

ZHU Ming[1], *YANG Peng*[2], *LIU Qi*[3,4], *WANG Yajun*[3,4], *ZHANG Haiyun*[3,4]

(1.Lanzhou Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730099, China;
2.Bayannur Western Copper Co., Ltd., Bayannur, Inner Mongolia 015500, China;
3.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
4.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In order to improve the reliability of rock mass quality evaluation in deep mines and overcome the controversial problem of index weight assignment in traditional evaluation models, five influencing factors were selected, with the help of moment estimation theory, a reasonable descending sequence of index weight was obtained, and the partial order set was introduced into rock mass quality classification. A comprehensive evaluation model of rock mass quality in underground mines based on moment estimation theory-partial order set was proposed. The model was tested with 12 typical rock samples as sample data and compared with the results of traditional evaluation models. The results show that the evaluation results of the model are completely consistent with the evaluation results of the matter-element extension model and the unascertained measure theory, and are completely consistent with the ranking results of the VIKOR model, indicating that it can accurately realize the rock mass quality classification and has good applicability in the rock mass quality evaluation under complex geological conditions. Finally, the model was applied to the evaluation of rock mass quality of a copper mine in Anhui Province. It is determined that marble belong to class Ⅱ rock mass, serpentinite and diorite porphyrite belong to class Ⅲ rock mass, and skarn belongs to class Ⅳ rock mass, which is consistent with the field investigation. Based on the results of rock mass quality classification, the support optimization scheme is proposed, and the optimized support scheme can effectively control the deformation of roadway and ensure the long-term stability of roadway.

Key words: Deep mine rock mass, Rock mass quality evaluation, Moment estimation theory, Partially order set, Support scheme

---

* **收稿日期**:2024-10-16
基金项目:国家重点研发项目(2023YFC2907404)
作者简介:朱明(1987—),男,江西南昌人,硕士,高级工程师,主要从事采矿设计咨询工作。E-mail:569230004@qq.com

0 引言

岩体质量评价工作是地下矿产资源开采的重要环节,是确定施工方案与支护方式及结构参数优化设计的重要依据,同时也是井下灾变预测的主要研究内容[1-2]。随着开采深度逐渐增加,地质条件越来越复杂,在爆破扰动、地应力等多重因素综合影响下,岩体质量会产生复杂的动态变化过程。因此,为保证地下金属矿山开采的安全性、高效性、持续性,需要科学合理进行岩体质量分级。

目前,在岩体质量评价研究方面,传统评价方法主要包括岩石质量 RQD 法[3]、RMR 法[4]、BQ 法[5]等,这些方法计算过程相对简单,但考虑因素有限,对复杂地质环境下的岩体质量评估适用性不强[6]。赵国彦等[7]基于白鲸优化算法改进随机森林模型(BWO-RF),利用 131 组工程实例对模型进行训练,模型预测精度提高至 90%。马世伟等[8]建立了岩体质量 KNN 动态分级模型,选取 150 个样本进行训练学习,校验结果显示,该智能模型准确率为 90%。张化进等[9]基于 D-S 理论,对 KNN、LR、NB、DT、SVM 和 ANN 等 6 个机器学习算法初评结果进行异质集成,以提高预测精度。机器学习算法可以通过编写程序实现岩体质量智能化分级,但需要构建庞大的样本训练集,且对训练集数据准确性、完整性要求极高。另外,学习算法忽略了指标因素的内在关联性,也容易出现过拟合等情况,从而导致最终预测精度不高或失效。岩体质量评估需要统筹考虑岩性、地质构造等多因素,影响因素之间存在复杂关系。越来越多的专家学者尝试利用建模思想进行岩体质量分析评估,为岩体质量分级提供了便捷途径,在一定程度上推动了岩体质量评估工作的发展。周晏渔等[10]考虑了指标因素之间的强交互性,应用 IAHP-GRA 法获取指标权重,提出了岩体质量多维云评价模型。李福佳等[11]以 RMR 法为理论基础,结合熵权法构造加权隶属度矩阵,进行岩体质量分级,提高了 RMR 法分级结果准确性。单梁等[12]将熵权灰色关联法与 D-S 理论相结合,建立了围岩质量分级的可信度模型。蒋英礼等[13]针对岩体质量分级评价的模糊性问题,收集建立了开放指标权重库,基于云雾化思想计算指标融合权重,构建了岩体质量可拓云模型。徐先锋等[14]基于 G1-EW-GT 法计算指标权重,基于 TOPSIS 思想判别岩体质量等级。

分析发现,已有的研究成果还存在一定的局限性,如云模型、D-S、TOPSIS 等理论首先需要选取合理的赋权法获取指标具体权重,权重结果存在争议性和主观性,且部分指标具有模糊性和不确定性,导致权重难以定量化。此外,上述模型大多计算过程相对复杂,需要借助专业性软件进行辅助计算,实用性不强。偏序集可以构造蕴含权重信息的偏序矩阵,通过简单矩阵累加变换体现评价对象的层级信息和聚类情况,实现评价对象的综合评估和比较,避免了权重争议问题,在风险评估方面具有稳健性、强鲁棒性等突出优势,且计算过程相对简单、可操作性强,应用效果较理想[15]。如韩梓晴等[16]、贾宝山等[17]以偏序集理论为基础,分别构建了硫化矿石和采空区煤炭的自燃风险评估模型。黄亮等[18]开展了采空区塌陷偏序集风险评价模型研究。赖文哲等[19]将 GT 理论与偏序集相耦合,确定了瓦斯爆炸风险等级。

鉴于此,本文将偏序集理论引入到地下金属矿山岩体质量评价中,提出基于矩估计理论和偏序集相结合的岩体质量评价新方法;选取 RQD 等主要因素构建评价指标体系,收集建立指标权重库,采用矩估计理论获取主、客观均衡兼顾的权重降序序列,通过 Hasse 图展示样本间的层集信息,合理确定岩体质量等级;以 12 个典型岩样为样本数据,检验模型的有效性;最后,将模型应用于安徽省某铜矿岩体质量评估,并根据岩体稳定性分级结果选取适宜的支护方案。

1 评估体系

地下工程岩体质量与岩性、地质构造、岩体状态等因素息息相关,因此,岩体质量分级属于典型的多准则综合决策过程。参考已有研究成果[10,13-14],遵循客观实际、可测可估、典型性、代表性等指标选取原则,筛选了 5 个主要影响因素,建立岩体质量评估指标体系。将岩体划分为 5 个等级,并按照指标属性特征,分为效益型指标(越大越好)和成本型指标(越小越好)两大类,指标分级判据见表 1。

表 1 岩体质量分级判据和指标属性

Table 1 Classification criterias and index attributes of rock mass quality

岩体质量等级	岩石质量 RQD/%	单轴抗压强度 R_c/MPa	岩体完整性系数 K_v	结构面强度系数 K_f	地下水渗水量 W/(L·(min·10m)$^{-1}$)
Ⅰ	90～<100	120～<200	≥0.75	≥0.80	<5
Ⅱ	75～<90	60～<120	0.45～<0.75	0.60～<0.80	5～<10
Ⅲ	50～<75	30～<60	0.30～<0.45	0.40～<0.60	10～<25
Ⅳ	25～<50	15～<30	0.20～<0.30	0.20～<0.40	25～<125
Ⅴ	<25	<15	<0.20	<0.20	125～<300
指标属性特征	效益型指标	效益型指标	效益型指标	效益型指标	成本型指标

2 理论模型

2.1 指标赋权

主观赋权法主要是由决策者基于主观经验对指标相对重要性做出判断和排序,通过一系列计算获取指标权重,具有一定的主观性和盲目性;客观赋权法是以评价对象指标数据为依据,能够反映待评对象真实状况,但对数据全面性要求较高;综合赋权法能够兼顾专家学识经验,又考虑了待评对象客观实际,能够获取较为均衡合理的指标权重。传统的组合赋权法主要采用线性加权或乘积归一化法计算指标权重,加权系数的确定较为简单随意。因此,本文应用以辛钦大数定律为基础的矩估计理论,基于偏差最小化思想对不同权重集合优化集成,使指标权重蕴含的信息更加全面。

矩估计理论计算时[2,20],假设一共选取了 q 种方式获取权重,其中单一主观赋权法 p 种,主观权重集合记为 w_{sk},客观赋权法 $q-p$ 种,客观权重集合记为 w_{ok},最优组合权重集合表示为 w_k,基于偏差最小化思想,有:

$$\begin{cases}\min y(k)=\alpha\sum_{s=1}^{p}(w_k-w_{sk})^2+\beta\sum_{o=p+1}^{q}(w_k-w_{ok})^2\\ \sum_{k=1}^{n}w_{sk}=1,0\leqslant w_k\leqslant 1,1\leqslant k\leqslant n\end{cases}\tag{1}$$

式中:α、β 分别为主、客观权重相对重要系数;n 为指标总数。

矩估计理论指标权重计算步骤如下。

(1) 计算指标权重集合期望。

$$\begin{cases}E(w_{sk})=\sum_{s=1}^{p}\dfrac{w_{sk}}{p}\\ E(w_{ok})=\sum_{o=p+1}^{q}\dfrac{w_{ok}}{q-p}\end{cases}\tag{2}$$

式中,$E(w_{sk})$ 和 $E(w_{ok})$ 分别为主、客观权重集合期望。

(2) 计算相对重要系数 α_k 和 β_k。

$$\begin{cases}\alpha_k=\dfrac{E(w_{sk})}{E(w_{sk})+E(w_{ok})}\\ \beta_k=\dfrac{E(w_{ok})}{E(w_{sk})+E(w_{ok})}\end{cases}\tag{3}$$

(3) 计算总体相对重要系数 α 和 β。

$$\begin{cases}\alpha=\dfrac{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k}{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k+\sum_{k=1}^{n}\beta_k}=\dfrac{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k}{n}\\ \beta=\dfrac{\sum_{k=1}^{n}\beta_k}{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k+\sum_{k=1}^{n}\beta_k}=\dfrac{\sum_{k=1}^{n}\beta_k}{n}\end{cases}\tag{4}$$

(4) 基于矩估计理论获取最优组合权重 w_k。

$$w_k=\frac{\alpha\sum_{s=1}^{p}w_{sk}+\beta\sum_{o=p+1}^{q}w_{ok}}{q}-\frac{\sum_{k=1}^{n}(\alpha\sum_{s=1}^{p}w_{sk}+\beta\sum_{o=p+1}^{q}w_{ok})-q}{nq}\tag{5}$$

2.2 偏序集理论

偏序集理论仅需要确定各影响因素在指标体系中贡献度的排序关系,通过系列矩阵变换,将权重信息耦合融入模型,可以较为清晰地表达决策者偏好。其具体定义如下。

定义 1:假设 A 为非空集合,P 为该集合的一个二元关系,当 R 满足:

(1) 自反性,对任意 $x\in A$,有 xPx;

(2) 反对称性,对任意 $x,y\in A$,若 xPy 且 yPx,则 $x=y$;

(3) 传递性,对任意 $x,y,z\in A$,若 xPy 且 yPz,则 xRz。

则称 P 为非空集合 A 上的偏序关系,偏序关系符合记为"≤",非空集合 A 上的偏序关系统称为偏序集,表示为$(A,\leqslant)$。

定义 2:假设评论集为 $M=(A,IC,D)$,偏序集记为$(A,\leqslant)$,偏序集中任意的 a_i、a_j,若 $a_i \geqslant a_j$,则 $r_{ij}=1$;若 $a_i < a_j$ 或 a_i 与 a_j 之间具有不可比性,则 $r_{ij}=0$。由此构造关于 r_{ij} 的矩阵,表示为 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{m\times m}$,称为偏序集$(A,\leqslant)$的比较关系矩阵。

假设选取 n 个评价指标,对 m 个待评对象进行多准则综合决策,当指标权重满足 $w_1 \geqslant w_2 \geqslant \cdots \geqslant w_n$ 时,通过矩阵累加变换,实现对待评对象的分析比较。其中含有指标权重信息的累加变换矩阵表示为:

$$\boldsymbol{D}=(d_{ij})_{m\times n}=\boldsymbol{X}\cdot\boldsymbol{I}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{11}+x_{12} & \cdots & x_{11}+x_{12}+\cdots+x_{1n} \\ x_{21} & x_{21}+x_{22} & \cdots & x_{21}+x_{22}+\cdots+x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1}+x_{m2} & \cdots & x_{m1}+x_{m2}+\cdots+x_{mn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{D}$ 为累加变换矩阵;$\boldsymbol{X}$ 为初始评价矩阵;$\boldsymbol{I}$ 为单位上三角矩阵。

对于任意偏序集$(A,\leqslant)$,集合 $O(x)=\{y\in A \mid x\geqslant y\}$ 称为偏序集 A 的下集;集合 $F(x)=\{y\in A \mid x\leqslant y\}$ 称为偏序集 A 的上集;定义集合 $U(x)$ 为 A 的不可比集,其中 $U(x)=A-O(x)-F(x)$。令 $|O(x)|$、$|F(x)|$ 和 $|U(x)|$ 分别为 3 个集合的元素个数,则存在如下关系:

$$|O(x)|+|F(x)|+|U(x)|=m+1 \tag{7}$$

为便于比较 m 个待评对象的优劣性,定义任意 $x\in A$ 方案在偏序集$(A,\leqslant)$上的高度 $\mathrm{hav}(x)$,公式[18]为:

$$\mathrm{hav}(x)=\frac{(m+1)\,|O(x)|}{|O(x)|+|F(x)|} \tag{8}$$

式中,$\mathrm{hav}(x)$ 表示偏序集高度,数值越大,待评对象越优。

2.3 实现过程

本文建立了基于矩估计理论和偏序集相结合的地下矿山岩体质量综合评价模型。首先,参考相关文献和结合工程实际,选取了 R_c、RQD、K_v、K_f 和 W 共 5 个主要影响因素,明确指标分级标准;然后,基于矩估计理论,对 4 种单一赋权法的指标权重进行优化集成,获取较为均衡的权重和合理的权重降序序列;为便于确定待评对象岩体质量等级,将指标分级端点值构成虚拟样本,与待评对象样本数据整合,基于偏序集理论,对所有样本数据进行标准化处理,并按照权重降序重新排列,计算蕴含指标权重信息的累加矩阵,经矩阵变换建立 Hasse 矩阵和绘制 Hasse 图,直观展现样本间的传递关系,实现所有样本数据聚类分级。基于矩估计理论和偏序集的地下金属矿山岩体质量综合评价模型实现过程如图 1 所示。

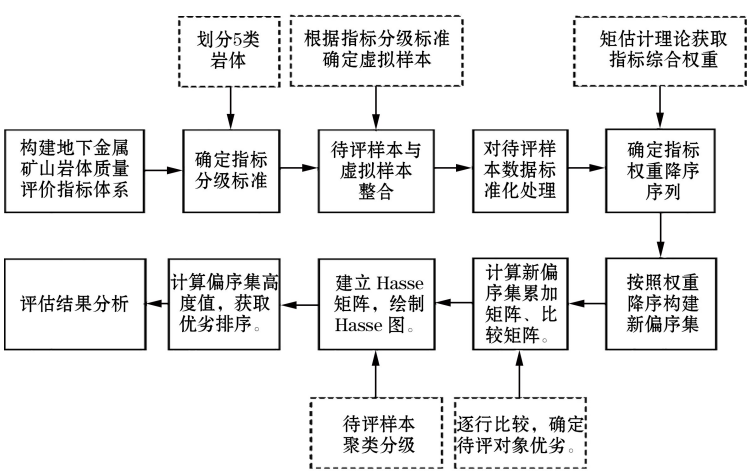


图 1 地下金属矿山岩体质量综合评价模型实现过程

Fig.1 Relization process of comprehensive evaluation model of rock mass quality in undergroud metal mines

3 模型检验

3.1 样本数据处理

以文献[21]中 12 个典型岩样数据为例,综合评价岩体质量等级,分析比较岩体稳定性状态。12 个典型岩样数据标记为 $A_1\sim A_{12}$。为便于直观确定 12 个典型岩样岩体质量等级,结合表 1 中各指标分级判据,取分级端点值构造岩体质量分级虚拟样本,4 个虚拟样本标记为 $B_1\sim B_4$,其中 B_1 样本代表Ⅰ类岩体,B_2 样本代表Ⅱ类岩体,B_3 样本代表Ⅲ类岩体,B_4 样本代表Ⅳ类岩体。

首先,对样本数据进行标准化处理(见式(9)和

式(10)),统一将样本数据区间范围转化为[0,1]。处理结果见表2。

$$x_{ij}^{*}=\frac{x_{ij}-\min(x_{xj})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})},x_{ij}\in\text{效益型指标} \quad (9)$$

$$x_{ij}^{*}=\frac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})},x_{ij}\in\text{成本型指标} \quad (10)$$

式中:x_{ij}^{*}表示标准化数据;x_{ij}表示岩样原始数据。

表2 样本数据处理结果

Table 2 Sample data processing results

样本	原始数据					数据标准化				
	RQD/%	R_c/MPa	K_v	K_f	W/(L·(min·10 m)$^{-1}$)	RQD	R_c	K_v	K_f	W
A_1	51.0	40.2	0.38	0.55	10.5	0.490 1	0.303 8	0.370 8	0.555 6	0.963 9
A_2	76.0	95.0	0.70	0.55	12.0	0.764 3	0.726 3	0.730 3	0.555 6	0.958 0
A_3	68.0	90.0	0.57	0.35	18.5	0.676 5	0.687 7	0.584 3	0.333 3	0.932 5
A_4	30.2	8.4	0.18	0.18	50.0	0.262 1	0.058 6	0.146 1	0.144 4	0.808 8
A_5	43.8	26.3	0.28	0.35	50.6	0.411 2	0.196 6	0.258 4	0.333 3	0.806 4
A_6	97.5	180.0	0.94	0.95	1.3	1.000 0	1.381 6	1.000 0	1.000 0	1.000 0
A_7	78.0	130.5	0.75	0.50	10.0	0.786 2	1.000 0	0.786 5	0.500 0	0.965 8
A_8	86.3	105.0	0.68	0.75	6.3	0.877 2	0.803 4	0.707 9	0.777 8	0.980 4
A_9	6.3	0.8	0.05	0.05	256.0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
A_{10}	52.5	28.6	0.38	0.16	23.0	0.506 6	0.214 3	0.370 8	0.122 2	0.914 8
A_{11}	31.3	18.8	0.23	0.25	100.0	0.274 1	0.138 8	0.202 2	0.222 2	0.612 5
A_{12}	56.3	37.5	0.34	0.45	21.3	0.548 2	0.283 0	0.325 8	0.444 4	0.921 5
B_1	90.0	120.0	0.75	0.80	5.0	0.917 8	0.919 0	0.786 5	0.833 3	0.985 5
B_2	75.0	60.0	0.45	0.60	10.0	0.753 3	0.456 4	0.449 4	0.611 1	0.965 8
B_3	50.0	30.0	0.30	0.40	25.0	0.479 2	0.225 1	0.280 9	0.388 9	0.906 9
B_4	25.0	15.0	0.20	0.20	125.0	0.205 0	0.109 5	0.168 5	0.166 7	0.514 3

3.2 指标权重

基于矩估计理论,收集不同单一赋权模式的岩体质量指标主、客观权重(见文献[13]),构建本文指标权重库,见表3。根据式(1)至式(4),计算主、客观权重集合期望和相对重要系数,其中,$E(w_{sk})$=(0.219,0.204,0.151 5,0.189,0.238),$E(w_{ok})$=(0.170 5,0.178 0,0.144 5,0.181 5,0.324 5);主观权重相对重要系数α_k=(0.559 8,0.533 4,0.508 5,0.508 8,0.426 4),客观权重相对重要系数β_k为(0.440 2,0.466 6,0.491 5,0.491 2,0.573 6),主观权重整体相对重要性系数α=0.507 4,客观权重整体相对重要性系数β=0.492 6。根据式(5),获取主、客观优化集成权重w_k=(0.195,0.197,0.174,0.192,0.242),岩体质量指标重要性排序为:W、R_c、RQD、K_f、K_v。

表3 不同赋权模式下指标权重结果

Table 3 Results of indicator weights under different weighting modes

赋权方式	权重属性	评价指标				
		R_c	RQD	K_v	K_f	W
改进AHP法	主观权重	0.235	0.207	0.092	0.151	0.315
德尔菲法	主观权重	0.200	0.200	0.208	0.223	0.169
粗糙集RS法	客观权重	0.200	0.200	0.133	0.200	0.267
CRITIC法	客观权重	0.142	0.156	0.157	0.161	0.384
矩估计理论	综合权重	0.197	0.195	0.174	0.192	0.242
综合排序		2	3	5	4	1

3.3 基于偏序集的评价过程

3.3.1 构建新偏序集矩阵

由表3可知,5个评价指标权重降序序列为$W>R_c>RQD>K_f>K_v$。根据式(6),结合岩样标准化处理结果,对标准化数据按照权重降序重新排序,构建蕴含指标权重信息的新偏序集矩阵,并计算累加矩阵。结果见表4。

3.3.2 建立Hasse矩阵

对累加矩阵逐行比较,建立比较关系矩阵$\boldsymbol{R}=(r_{ij})_{m\times m}$。具体结果见表5。

表 4 样本数据的累加数据

Table 4 Accumulated data of sample data

样本	W	R_c	RQD	K_f	K_v
A_1	0.963 9	1.267 7	1.757 8	2.313 3	2.684 1
A_2	0.958 0	1.684 3	2.448 5	3.004 1	3.734 4
A_3	0.932 5	1.620 2	2.296 7	2.630 1	3.214 3
A_4	0.808 8	0.867 4	1.129 5	1.273 9	1.420 0
A_5	0.806 4	1.003 0	1.414 2	1.747 6	2.006 0
A_6	1.000 0	2.381 6	3.381 6	4.381 6	5.381 6
A_7	0.965 8	1.965 8	2.752 0	3.252 0	4.038 5
A_8	0.980 4	1.783 8	2.661 0	3.438 7	4.146 6
A_9	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
A_{10}	0.914 8	1.129 1	1.635 7	1.757 9	2.128 7
A_{11}	0.612 5	0.751 3	1.025 4	1.247 6	1.449 9
A_{12}	0.921 5	1.204 4	1.752 7	2.197 1	2.523 0
B_1	0.985 5	1.904 5	2.822 3	3.655 6	4.442 1
B_2	0.965 8	1.422 3	2.175 6	2.786 7	3.236 1
B_3	0.906 9	1.132 1	1.611 3	2.000 1	2.281 0
B_4	0.514 3	0.623 8	0.828 9	0.995 5	1.164 1

表 5 样本数据比较矩阵

Table 5 Comparison matrix of sample data

样本	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
A_2	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
A_3	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
A_4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
A_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
A_6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A_7	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
A_8	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
A_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
A_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
A_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
A_{12}	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
B_1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
B_2	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
B_3	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
B_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

比较关系矩阵无法直观体现各岩样之间的传递关系,需要运用布尔运算的哈斯图解析方法,将比较矩阵转换为 Hasse 矩阵,并绘制 Hasse 图,展现岩样层级信息。其中,Hasse 矩阵转换公式为:

$$\boldsymbol{H}_R=(\boldsymbol{R}-\boldsymbol{E})-(\boldsymbol{R}-\boldsymbol{E})*(\boldsymbol{R}-\boldsymbol{E}) \tag{11}$$

式中:$\boldsymbol{H}_R$为 Hasse 矩阵;$\boldsymbol{R}$ 为比较关系矩阵;$\boldsymbol{E}$ 为单位矩阵;$*$ 为布尔运算符号。

根据式(11),计算 Hasse 矩阵,具体结果见表 6,岩体质量 Hasse 图如图 2 所示。

表 6 样本数据的 Hasse 矩阵

Table 6 Hasse matrix of sample data

样本	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	B_1	B_2	B_3	B_4
A_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
A_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
A_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
A_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
A_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
A_7	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
A_8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
A_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
A_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
B_1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B_3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

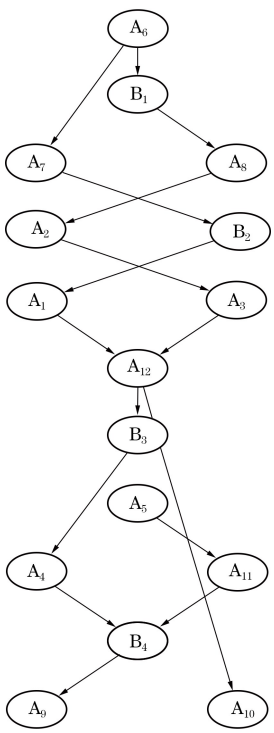


图 2 样本数据的 Hasse 图

Fig.2 Hasse diagram of sample data

3.3.3 Hasse 图结构化解读

Hasse 图是由有向线段构成,以体现优劣关系的传递特征,即上一层次集合优于下一层次集合,位于 Hasse 图最顶端表示岩体质量最好,位于 Hasse 图最底端则表示岩体质量最差。根据 Hasse 图,将 16 个岩样划分为 5 个层级,分别为第一层级(样本 A_9)、第二层级(样本 A_4、样本 A_5、样本 A_{10}、样本 A_{11}、样本 B_4)、第三层级(样本 A_1、样本 A_3、样本 A_{12}、样本 B_3)、第四层级(样本 A_2、样本 A_7、样本 A_8、样本 B_2)、第五层级(样本 A_6、样本 B_1)。

结合偏序集理论和 Hasse 图展现的层级关系,同一层级的样本应隶属于同一等级。具体而言,样本 A_6 位于样本 B_1 上一层级,则样本 A_6 为Ⅰ类岩体;样本 A_2、样本 A_7、样本 A_8 与样本 B_2 位于同一层次,则样本 A_2、样本 A_7、样本 A_8 均为Ⅱ类岩体;样本 A_1、样本 A_3、样本 A_{12} 与样本 B_3 处于同一层级,则样本 A_1、样本 A_3、样本 A_{12} 均为Ⅲ类岩体;样本 A_4、样本 A_5、样本 A_{10}、样本 A_{11} 与样本 B_4 处于同一层级,则样本 A_4、样本 A_5、样本 A_{10}、样本 A_{11} 均为Ⅳ类岩体;而样本 A_9 位于样本 B_4 的下一层级,则样本 A_9 为Ⅴ类岩体。

通过岩体质量 Hasse 图可以确定 12 个评价对象的岩体质量等级,而当处于同一层级的样本较多时,如样本 A_4、样本 A_5、样本 A_{10}、样本 A_{11} 均为Ⅳ类岩体,无法对同一层级内岩样稳定性进行排序。根据式(7)和式(8),计算各评价对象偏序集高度值,基于高度值大小,对所有样本进行综合排序比较。为验证基于偏序集理论的地下金属矿山岩体质量排序结果的可靠性,与 TOPSIS 和 VIKOR 模型评价结果进行比较。3 个模型的排序结果见表 7。

由表 7 可知,通过计算偏序集高度值,12 个典型岩样稳定性排序依次为:样本 A_6>样本 A_7>样

本 A_8>样本 A_2>样本 A_1=样本 A_3>样本 A_{12}>样本 A_5>样本 A_4>样本 A_{11}>样本 A_{10}>样本 A_9。对比发现,基于偏序集理论的岩体质量综合排序的结果与 VIKOR 模型完全一致,表明偏序集理论在岩体质量综合评估方面具有适用性。但与 TOPSIS 模型存在一些差异。原因在于传统 TOPSIS 模型是基于欧式距离算法,通过计算贴近度进行评价对象优劣性排序,容易出现评价对象与正、负理想解均接近,而贴近度差异不大,优劣性区分带有模糊性,可能导致排序失效。

表 7 线性排序结果

Table 7 Linear sorting results

评价对象	上集 $\|F(x)\|$	下集 $\|O(x)\|$	不可比集 $\|U(x)\|$	高度值 hav(x)	综合排序		
					本文	TOPSIS	VIKOR
样本 A_1	6	9	2	10.200	7	7	7
样本 A_2	5	10	2	11.333	5	4	5
样本 A_3	6	9	2	10.200	8	8	8
样本 A_4	11	3	3	3.643	12	15	12
样本 A_5	11	4	2	4.533	11	11	11
样本 A_6	1	16	0	16.000	1	1	1
样本 A_7	2	13	2	14.733	3	5	3
样本 A_8	3	13	1	13.813	4	3	4
样本 A_9	15	1	1	1.063	16	16	16
样本 A_{10}	10	1	6	1.545	15	14	15
样本 A_{11}	12	3	2	3.400	13	12	13
样本 A_{12}	9	8	0	8.000	9	9	9
样本 B_1	2	14	1	14.875	2	2	2
样本 B_2	5	10	2	11.333	6	6	6
样本 B_3	10	6	1	6.375	10	10	10
样本 B_4	14	2	1	2.125	14	13	14

3.4 评价结果比较

样本数据评价结果对比见表 8。由表 8 可知,基于矩估计理论和偏序集模型的岩体质量评价结果与物元可拓模型、未确知测度理论所得结果完全一致,验证了本文模型的可靠性。

物元可拓模型是用于定量评估的经典模型,计算过程相对复杂;未确知测度理论需要人为设置置信度,评估结果具有一定主观性。这两种模型均需要确定具体的指标权重,对指标权重结果精准度要求较高。与上述传统模型相比,基于偏序集理论的地下金属矿山岩体质量评价模型不需要过分纠结于权重计算结果的准确性,只需要保证指标权重降序信息一致,通过构造蕴含权重信息的新偏序集矩阵,进行矩阵数学变换求解,基于 Hasse 图实现评估对象聚类分级,有效反映了评价对象之间的层级信息和传递关系,保证评价结果合理可靠,避免了指标权重争议问题。此外,该方法可以依托 EXCEL 等软件实现关键步骤运算,计算过程简便,具有较强的操作性。

表 8 样本数据岩体质量等级评价结果对比

Table 8 Comparison of rock mass quality grade evaluation results of sample data

样本	本文	物元可拓模型	未确知测度理论	实际
A_1	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体
A_2	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体
A_3	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体
A_4	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体
A_5	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体
A_6	Ⅰ类岩体	Ⅰ类岩体	Ⅰ类岩体	Ⅰ类岩体
A_7	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅱ类岩体
A_8	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体
A_9	Ⅴ类岩体	Ⅴ类岩体	Ⅴ类岩体	Ⅴ类岩体
A_{10}	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体
A_{11}	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体
A_{12}	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体

4 工程应用

安徽省某铜矿经过多年开采,矿区浅表部资源已逐渐枯竭,为提高企业经济效益,继续向深部矿体进行开采。经过地质勘查,该矿山深部最主要矿体铁矿资源量为 700 万 t,占深部铁矿总资源量的 35.71%。矿体赋存标高为-638.16~-907.35 m,平均厚度为 17.65 m,变化中等。矿岩主要有矽卡岩、蛇纹岩、闪长玢岩和大理岩等,节理、裂隙较为发育。目前,该矿山主要采取喷锚组合支护,但因未统筹考虑矿区整体岩性变化以及井巷工程的种类与用途,导致支护方式与手段相对单一、缺乏规范指导,实际回采过程中,受地压或开采扰动等影响,巷道出现了不同程度塌落、变形甚至堵塞,支护失效问题频发。为保证深部矿产资源安全、高效回采,迫切需要在调查、统计与分析矿区典型岩组及岩体结构的基础上,确定岩体质量分级,并根据不同岩性,选取适宜的支护方案。

为此,基于矩估计理论和偏序集模型,对蛇纹岩(P_1)、大理岩(P_2)、闪长玢岩(P_3)和矽卡岩(P_4)4 种典型矿岩进行岩体质量评价。按照式(9)和式(10),对 4 种矿岩和 4 个虚拟样本进行标准化处理,具体结果见表 9。

表 9 待评对象标准化处理结果

Table 9 Standardized processing results of evaluated objects

待评对象	R_c	RQD	K_v	K_f	W
P_1	0.289 1	0.694 4	0.403 2	0.640 6	0.575 8
P_2	0.335 9	0.888 9	0.741 9	0.906 3	0.681 8
P_3	0.171 9	0.208 3	0.225 8	0.234 4	0.982 6
P_4	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
B_1	0.820 3	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
B_2	0.351 6	0.791 7	0.516 1	0.687 5	0.962 1
B_3	0.117 2	0.444 4	0.274 2	0.375 0	0.848 5
B_4	0.000 0	0.097 2	0.112 9	0.062 5	0.090 9

4 种典型岩体的 Hasse 图如图 3 所示。由图 3 可知,待评对象 P_2 与样本 B_2 处于同一层级,表示该矿山大理岩岩性属于Ⅱ类岩体;待评对象 P_1、待评对象 P_3 与样本 B_3 位于同一层级,表示该矿山蛇纹岩与闪长玢岩岩性属于Ⅲ类岩体;待评对象 P_4 与样本 B_4 处于同一层级,表明该矿山矽卡岩岩性属于Ⅳ类岩体。

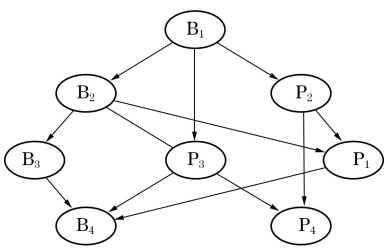


图 3 待评对象的 Hasse 图

Fig.3 Hasse diagram of evaluated objects

为进一步验证基于矩估计理论和偏序集的综合评价模型结果的可靠性,与传统 RMR 法和 Q 系统法评估结果进行对比,见表 10。

表 10 待评对象评价结果对比

Table 10 Comparison of evaluation results of evaluated objects

待评对象	本文模型	传统 RMR 法	Q 系统法	实际状态
P_1	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体
P_2	Ⅱ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅱ类岩体	Ⅱ类岩体
P_3	Ⅲ类岩体	Ⅲ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅲ类岩体
P_4	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体	Ⅳ类岩体

由表 10 可知,应用矩估计理论和偏序集相结合的综合评价模型的分析结果与传统 RMR 法评估结果基本一致,仅在岩样 P_2 上存在差异,岩样 P_3 的评价结果则与 Q 系统法存在不同。其原因在于,传统 RMR 法未充分考虑岩体结构面强度,而偏序集模型将结构面强度列为影响因素,在深井矿山软岩岩体质量评估方面适用性更好;Q 系统法考虑因素相对全面、计算公式直观,但是在具体指标含义与取值方面,如应力折减系数的取值上较为困难、主观性较强。总体而言,相比传统 RMR 法和 Q 系统法,基于矩估计理论和偏序集的综合评价模型的岩体质量分级结果合理可靠,具有一定实用性和可操作性。

结合工程实际,对于Ⅱ类岩体,根据巷道使用年限或破碎情况,主要选用喷射混凝土方式进行支护,厚度为 50 mm;对于Ⅲ级岩体,在巷道开挖后,先进行素喷支护,然后预留一定时间,依靠围岩自身稳定能力,充分释放地应力,后期采用锚杆、金属网和喷浆联合支护方式;对于Ⅳ类岩体,在巷道开挖后,及时进行初喷以控制围岩变形,然后采用喷锚网+长锚索的联合支护方案。经过实践验证,基于岩体质量分级的支护优化方案可以有效控制巷道侧帮及底板变形,显著减少冒顶、底鼓、片帮等现象,确保巷道长期稳定。

5 结论

(1) 针对传统组合赋权结果不准确的问题,基于矩估计理论,对指标赋权结果进行优化集成,确定综合权重,使指标权重蕴含信息更加全面,获取了较为科学合理的指标权重排序,结果为:$W>R_c>RQD>K_f>K_v$。

(2) 建立了基于矩估计理论和偏序集的综合评价模型,以 12 个典型岩样为例,构造蕴含指标信息的新偏序集矩阵,通过矩阵变换计算 Hasse 矩阵并绘制 Hasse 图,直观展示评价对象间的层级信息,实现对岩体质量综合评估,并与传统评估模型结果比较,结果显示,该模型评价结果与物元可拓模型、未确知测度理论的评价结果完全一致,与 VIKOR 模型的排序结果完全吻合,表明其能准确实现岩体质量分级,在复杂地质条件下的岩体质量评估中具有良好适用性。

(3) 以安徽省某铜矿为研究背景,确定岩体质量分级结果。结果表明,该矿山大理岩属于Ⅱ类岩体,蛇纹岩与闪长玢岩属于Ⅲ类岩体,矽卡岩属于Ⅳ类岩体。基于岩体质量分级结果提出支护优化方案(如Ⅱ类岩体主要选用喷射混凝土方式进行支护等),有效控制了巷道侧帮及底板变形,降低了冒顶、底鼓、片帮等现象,确保巷道长期稳定。

参考文献(References):

[1] 王贤来,崔继强,张鹏强,等.静动载条件下深部破碎巷道支护设计及稳定性分析[J].金属矿山,2024(7):17-23.
WANG Xianlai, CUI Jiqiang, ZHANG Pengqiang, et al. Support design and stability analysis of deep fractured roadway under static and dynamic condition[J].Metal Mine, 2024(7):17-23.

[2] 凡奥奇,王万禄,李树建,等.基于优化组合赋权的可拓学磷矿山岩体质量评价[J].黄金科学技术,2024,32(1):132-143.
FAN Aoqi, WANG Wanlu, LI Shujian, et al. Evaluation of rock mass quality of phosphorite mines by topology based on optimal combination weight [J]. Gold Science and Technology,2024,32(1):132-143.

[3] 赵兴东,王宏宇,王小兵,等.基于智能自学习模型识别岩芯的RQD标定方法[J].矿业研究与开发,2023,43(12):159-165.
ZHAO Xingdong, WANG Hongyu, WANG Xiaobing, et al. RQD calibration method for core recognition based on intelligent self-learning model [J]. Mining Research and Development,2023,43(12):159-165.

[4] 葛伟杰,刘艳章,秦绍兵,等.考虑采动影响的ACI-RMR法矿山巷道围岩质量分级研究[J].有色金属工程,2023,13(9):121-129.
GE Weijie, LIU Yanzhang, QIN Shaobing, et al. Quality classification for roadway surrounding rock by ACI-RMR method considering the influence of mining[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(9):121-129.

[5] 郭松峰,祁生文,SAROGLOU Charalampos. A-BQ,一种基于BQ的各向异性岩体质量分级系统(英文)[J].Journal of Central South University,2020,27(10):3090-3102.
GUO Songfeng, QI Shengwen, SAROGLOU Charalampos. A-BQ, a classification system for anisotropic rock mass based on china national standard[J].Journal of Central South University,2020,27(10):3090-3102.

[6] 吴峰,张海云,方前程.基于岩体质量分级的地下矿山巷道支护设计[J].矿业研究与开发,2021,41(6):84-88.
WU Feng, ZHANG Haiyun, FANG Qiancheng. Roadway support design in underground mine based on rock mass quality classification[J].Mining Research and Development, 2021,41(6):84-88.

[7] 赵国彦,胡凯译,李洋,等.基于BWO-RF模型的岩体质量评价方法[J].黄金科学技术,2024,32(2):270-279.
ZHAO Guoyan, HU Kaiyi, LI Yang, et al. Evalution method of rock mass quality based on BWO-RF model[J]. Gold Science and Technology,2024,32(2):270-279.

[8] 马世伟,李守定,李晓,等.隧道岩体质量智能动态分级KNN方法[J].工程地质学报,2020,28(6):1415-1424.
MA Shiwei, LI Shouding, LI Xiao, et al. KNN method for intelligent observational classification of rock mass quality in tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1415-1424.

[9] 张化进,吴顺川,韩龙强,等.基于改进Dempster-Shafer证据理论的岩体质量异质集成评价方法[J].岩土力学,2022,43(增刊1):532-541.
ZHANG Huajin, WU Shunchuan, HAN Longqiang, et al. Heterogeneous ensemble evaluation method of rock mass quality based on improved dempster-shafer evidence theory [J].Rock and Soil Mechanics,2022,43(Suppl.1):532-541.

[10] 周晏渔,豆龙,林卫星,等.基于IAHP-GRA和多维联系云的岩体质量评价和应用[J].矿业研究与开发,2024,44(8):173-181.
ZHOU Yanyu, DOU Long, LIN Weixing, et al. Rock mass ouality evaluation and application based on IAHP-GRA and multi-dimensional connection cloud[J].Mining Research and Development,2024,44(8):173-181.

[11] 李福佳,刘艳章,秦绍兵,等.基于加权隶属度矩阵的岩体质量优化分级及支护研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(2):52-61.
LI Fujia, LIU Yanzhang, QIN Shaobing, et al. Research on rock mass quality optimization classification and support based on weighted membership matrix[J].Journal of Mining and Strata Control Engineering,2024,6(2):52-61.

[12] 单梁,刘艳章,孙明伟,等.基于EWGR-DSTE的巷道围岩质量分级可信度研究[J].金属矿山,2023(10):53-59.
SHAN Liang, LIU Yanzhang, SUN Mingwei, et al. Credibility study of roadway surrounding rock quality classification based on EWGR-DSTE[J].Metal Mine,2023(10):53-59.

[13] 蒋英礼,崔杰,张兰峰,等.基于权重融合-改进可拓云模型的岩体质量评价方法与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(8):84-90.
JIANG Yingli, CUI Jie, ZHANG Lanfeng, et al. Evaluation method and application of rock mass quality based on weight fusion-improved extension cloud model[J].Mining Research and Development,2023,43(8):84-90.

[14] 徐先锋,邢鹏飞,王岁红,等.基于博弈论G1-EW-TOPSIS法的岩体质量评价和应用[J].黄金科学技术,2022,30(5):704-712.
XU Xianfeng, XING Pengfei, WANG Suihong, et al. Rock mass quality evaluation and application based on game theory and G1-EW-TOPSIS method[J]. Gold Science and Technology,2022,30(5):704-712.

[15] 姚利微.基于偏序集的多属性权重稳健性研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023.
YAO Liwei. Research on robustness of multi-attribute weights based on partially ordered set[D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2023.

[16] 韩梓晴,李孜军,徐圆圆.基于偏序集的硫化矿石自燃倾向性评价[J].黄金科学技术,2022,30(1):105-112.
HAN Ziqing, LI Zijun, XU Yuanyuan. Evaluation of spontaneous combustion tendency of sulfide ore based on partial ordered set[J].Gold Science and Technology,2022,30(1):105-112.

[17] 贾宝山,程禹熙,陈金全,等.基于偏序集评价模型的煤自燃危险性研究[J].安全与环境学报,2021,21(3):977-983.

JIA Baoshan, CHENG Yuxi, CHEN Jinquan, et al. Spontaneous combustion risk analysis of the coal sample from Hanjiawa Coal Mine based on the partially ordered set[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(3):977-983.

[18] 黄亮,王会敏,岳立柱,等.基于偏序集的采空区塌陷危险性评价研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(4):134-140.
HUANG Liang, WANG Huimin, YUE Lizhu, et al. Study on risk assessment of goaf collapse based on partial order set[J]. Journal of Safety Science and Technology,2019,15(4):134-140.

[19] 赖文哲,邵良杉.基于博弈论偏序集的煤矿瓦斯爆炸风险评价模型研究[J].运筹与管理,2023,32(9):136-142.
LAI Wenzhe, SHAO Liangshan. Research on coal mine gas explosion risk evaluation model based on partially ordered sets of game theory[J]. Operations Research and Management Science,2023,32(9):136-142.

[20] 谭立伟,温少卿,李开华,等.基于改进 G2-EWM-TOPSIS 模型的引水隧洞塌方风险评价[J].科学技术与工程,2023,23(30):13105-13111.
TAN Liwei, WEN Shaoqing, LI Kaihua, et al. Collapse risk assessment of diversion tunnel based on improved G2-EWM-TOPSIS model[J]. Science Technology and Engineering, 2023,23(30):13105-13111.

[21] 胡建华,尚俊龙,雷涛.基于 RS-TOPSIS 法的地下工程岩体质量评价[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(11):4412-4419.
HU Jianhua, SHANG Junlong, LEI Tao. Rock mass quality evaluation of underground engineering based on RS-TOPSIS method[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2012,43(11):4412-4419.